

MUISTIO No            CFD/TERMO-11-96

pvm 15 tammikuuta, 1997

## OTSIKKO

Liukuvan hilan reunaehdon implementointi FINFLOon

LAATIJA(T)

Esa Salminen

## TIIVISTELMÄ

Pyörivissä koneissa esiintyy tyypillisesti roottori-staattori-tyyppisiä ratkaisuja, joiden käsittely numeerisissa virtaussimuloinneissa edellyttää reunaehtojen päivittämistä myös tilanteissa, joissa laskentakopit eivät ole tarkasti kohdakkain. Tällaista reunaehtoä nimitetään liukuvaksi hilaksi (sliding mesh). Tässä muistiossa kuvataan liukuvan hilan reunaehdon implementointi FINFLO-virtausratkaisijaan.

## PÄÄKOHDAT

FINFLOon uusi aliohjelma SLD/SLIMES (noin 900 riviä)

## SIVUJA

9

## AVAINSANAT

CFD, sliding mesh, rotating machinery

## TARKASTANUT

Timo Siikonen

Joulukuu 17, 1996

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Menetelmän periaate</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Oletukset ja rajoitukset</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Muutokset FINFLOssa</b>	<b>3</b>
<b>5</b>	<b>Muutokset reunaehtotiedostossa</b>	<b>4</b>
<b>6</b>	<b>Reunaehdon testaus</b>	<b>4</b>
<b>7</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>9</b>

## 1 Johdanto

Pyörivissä koneissa esiintyy tyypillisesti roottori-staattori-tyyppisiä ratkaisuja, joiden käsittely numeerisissa virtaussimuloinneissa edellyttää reunaehtojen päivittämistä myös tilanteissa, joissa laskentakopit eivät ole tarkasti kohdakkain. Tällaista reunaehto nimitetään liukuvaksi hilaksi (sliding mesh). Liukuvan hilan käyttö vaatii huomattavasti vähemmän laskenta-aikaa kuin varsinainen päällekkäisten hilojen tekniikka (Chimera). Tästä syystä moniin virtausratkaisijoihin on erikseen implementoitu myös liukuvan hilan reunaehto, vaikka se voidaankin ajatella Chimera-reunaehdon erikoistapaukseksi. Tässä muistiossa kuvataan liukuvan hilan reunaehdon implementointi FINFLO-virtausratkaisijaan [1].

Peruseriaatteeltaan liukuvan hilan reunaehto ja Chimera-reunaehto ovat hyvin samanlaiset. Kummassakin suureiden arvot joudutaan interpoloimaan hilasta toiseen. Periaatteessa Chimera-reunaehdon implementointi on yksinkertaisempi ja suoraviivaisempi tehtävä. Liukuvan hilan tapauksessa joudutaan ottamaan huomioon toisiinsa nähden liikkuvien lohkojen orientaatio, pyörimissuunta, koppijako jne., joista ei tarvitse välittää Chimera-reunaehdossa. Käytännössä Chimera-reunaehdon implementointi muuttuu kuitenkin mutkikkaammaksi, jos sallitaan useita päällekkäisiä hiloja tai Chimera-lohkojen sallitaan työntyvän kiinteiden osien sisään (ulos laskenta-alueesta).

## 2 Menetelmän periaate

Reunaehdon päivittäminen liukuvan pinnan yli tehdään kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa rajapinnan vastakkaisilla puolilla olevien haamukoppien arvot päivitetään olettaen roottorin asentokulmaksi nolla (tavallinen CONnektointi). Toisessa vaiheessa haamukoppeihin kopioidut arvot rulataan kehän suunnassa roottorin asentokulmaa vastaaviin kohtiin. Koska koppijako kehän suunnassa voi olla mielivaltaisen (kuitenkin siten, että roottorin asentokulman ollessa nolla roottorin ja staattorin kopit yhtyvät), haamukopeille lasketaan painokertoimet, jotka kertovat missä suhteessa tämän haamukopin kohdalle osuvia varsinaisen laskenta-alueen arvoja käytetään haamukoppiin tulevia arvoja laskettaessa. Haamukopin arvoja, jotka voidaan ajatella sijoitetuiksi haamukopin keskipisteseen, ei siis suoraan interpoloida lähimmäksi haamukopin keskipistettä osuvien laskenta-alueen kopioiden avulla vaan 'interpoloinnissa' otetaan huomioon kaikki haamukopin alueelle osuvat laskenta-alueen kopit. Menettelyn tavoitteena on taata suureiden jatkuvuus rajapinnan yli.

Olkoon  $C_j$  roottorin haamukoppiin tuleva suureen arvo (kuva 1), joka joudutaan laskemaan staattorin suureiden avulla. Olettamalla suure paloittain vakioksi saadaan

$$C_j = \sum_m C_m N_j^m$$

missä painokerroin

$$N_j^m = \begin{cases} 0, & \text{jos } \phi_{m+1/2} < \phi_{j-1/2} \\ 0, & \text{jos } \phi_{m-1/2} > \phi_{j+1/2}, \text{ ja muulloin} \\ \frac{1}{\Delta\phi_j} \int_{\max(\phi_{m-1/2}, \phi_{j-1/2})}^{\min(\phi_{m+1/2}, \phi_{j+1/2})} d\phi & \end{cases}$$

kuva staattorin kopin  $m$  suhteellista osuutta (kulmaa) haamukopin  $j$  kohdalla ( $0 \leq N_j^m \leq 1$ ).

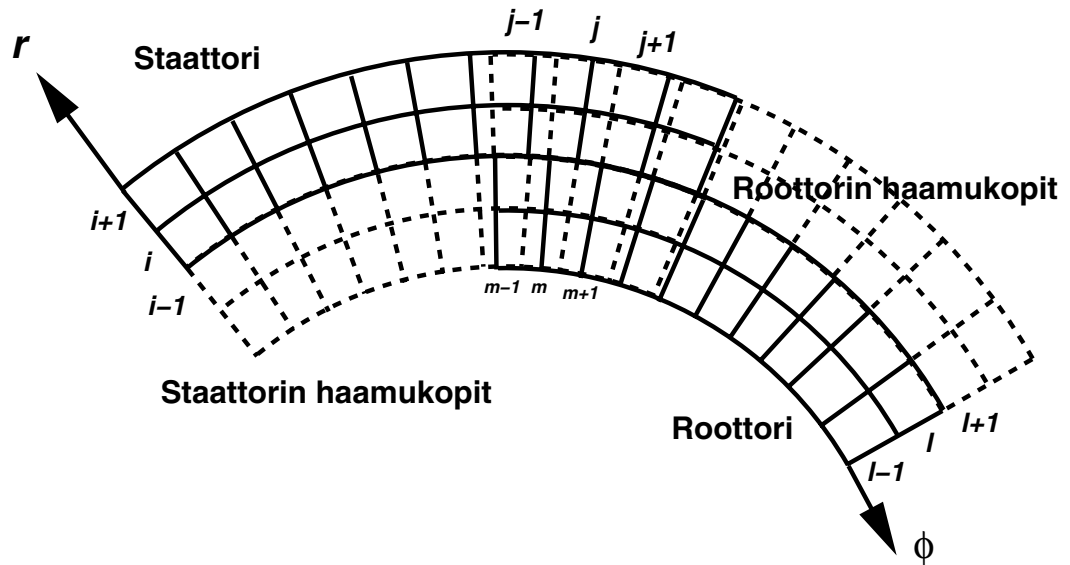
Paloittain laskettu suure säilyy

$$\sum_j C_j \Delta \phi_j = \sum_m C_m \Delta \phi_m$$

sillä  $\sum_j N_j^m \Delta \phi_j = \Delta \phi_m = \phi_{m+1/2} - \phi_{m-1/2}$ . Oletus, että suure on paloittain vakio, aiheuttaa kuitenkin sen, että tarkkuus on vain ensimmäistä kertalukua. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että interpoloitaessa tiheästä hilasta harvaan hilaan, tiheästä hilasta 'integroitu' arvo kuvaa hyvin suureen keskimääräistä arvoa. Toiseen suuntaan interpoloitaessa tarkkuus on huonompi, sillä yksittäinen suuri koppi ei pysty kuvaamaan yksityiskohtaista jakautumaa, jonka todellisuudessa pitäisi siirtyä tiheämpään hilaan. Interpoloinnin tarkkuutta voisi parantaa olettamalla suure koppien välillä lineaarisesti muuttuvaksi (toisen kertaluvun tarkkuus) [2].

Jos kehän suunnassa on  $N$  laskentakoppia, tuloksena on  $(N + 2) \times (N + 2)$  painokerroinmatriisi. Kakkoset edellä aiheutuvat kehän suunnassa olevista haamukopeista; kummallakin (tavallisesti syklisellä) reunalla päivitetään yksi haamukoppi (näitä haamukoppeja ei ole piirretty kuvaan 1). Tämä sama painokerroinmatriisi on voimassa kaikilla kehän suuntaisilla koppiriveillä. Se joudutaan laskemaan siis vain kerran kutakin liukuvaa pintaa kohti.

Painokerroinmatriisi ei yksinään kuitenkaan riitä haamukoppien arvojen laskemiseksi. Vektoreiden ja tensoreiden rullaamiseksi tarvitaan lisäksi kolme erilaista kiertomatriisia. Yksi näistä matriiseista kääntää roottorin ja staattorin arvot toistensa kohdalle siten, että asentokulma roottorin ja staattorin välillä tulee pienemmäksi kuin syklisyyskulma (roottori ja staattori ovat ainakin osaksi kohdakkain). Tätä matriisia tarvitaan silloin kun laskettavasta kappaleesta on mallitettu vain osa, esimerkiksi yksi impellerin kanava, mutta roottorin annetaan vapaasti pyöriä kulmille, jotka ovat suurempia kuin syklisyyskulma. Kaksi muuta matriisia tarvitaan tekemään edellä kuvattu kääntö ja lisäksi rullaamaan arvoja syklisyyskulman verran (+/-)-suuntiin.



Kuva 1: Haamukoppiarvojen päivitys liukuvassa hilassa.

### 3 Oletukset ja rajoitukset

Uuden reunaehdon implementointia suunniteltaessa asetettiin seuraavat tehtävää yksinkertaistavat vaatimukset:

- Pinnat liikkuvat toisiinsa nähden pyörien, ei lineaarisesti.
- Liukuvalla pinnalla oleva laskentaverkko on voitava generoida pyöräyttämällä.
- Jollakin ajan hetkellä liukuvan pinnan eri puolilla olevat laskentaverkot yhtyvät.
- SLD-reunaehtotilkun on ulotuttava kehän suunnassa koko syklistyyskulman yli; kehän suunnassa ei voi olla peräkkäin kahta SLD-reunaehtotilkua, ei saman eikä kahden eri lohkon pinnalla.

Näiden vaatimusten ei katsottu liiaksi rajoittavan reunaehdon käytettävyyttä. Vaatimuksista toinen saa aikaan sen, että liukuvalla pinnalla kaikilla kehän suuntaisilla kopperiveillä koppien keskenäinen pituusjakautuma on samanlainen. Vaatimuksista kolmas puolestaan helpottaa tehtävää siten, että esimerkiksi roottorin puolen haamukoppeja päivitettäessä ei tarvita erikseen tietoja staattorin puolen hilasta. Yleisessä tapauksessa olisi tietysti parempi, jos pintahilat staattorin ja roottorin pinnoilla voisivat olla erilaiset.

### 4 Muutokset FINFLOSSa

Uusi reunaehtoaliohjelma (SLIMES) kirjoitettiin tiedostoon `rot dia.f`, joka sisältää kaikki muutkin pyörimiseen liittyvät aliohjelmat. Tätä aliohjelmaa kutsutaan pääohjelmassa (`ns3c.f`) olevasta SLD-aliohjelmasta erikseen kunkin lohkon alkuosoitteella. SLD-aliohjelmaa puolestaan kutsutaan pääohjelmasta kahdesta eri kohdasta. Toinen näistä kutsuista tekee varsinaisen reunaehdon päivittämisen ja toinen päivittää haamukoppiarvot jälkikäsitteilyä varten ennen nurkkapistemoodituloituksia. SLIMES-aliohjelmassa on noin 900 FORTRAN-riviä.

Keskeisimmät SLIMES-aliohjelman rutiinit ovat SFTSLC, SFTVEC ja SFTTEN. Nämä aliohjelmat rullaavat yhden kehän suuntaisen kopperivin arvot halutulle kohdalle. Skalaarien, vektorien ja tensorien käsittelyä varten on erilliset ohjelmat. Ennen näiden aliohjelmien kutsumista lasketaan koppien suhteelliset pituudet kehän suunnassa (vaatii orientaation tunnistuksen), lasketaan painokerroinmatriisi ja kolme kiertomatriisia. Itse asiassa painokerroinmatriisikin lasketaan hajautettuna kolmeen osaan. Nollasta poikkeava matriisi (matriisin alkio voi olla nollasta poikkeava vain yhdessä osamatriisissa kerrallaan) määrää mitä kolmesta kiertomatriisista on käytettävä vektoreita ja tensoreita kierrettäessä.

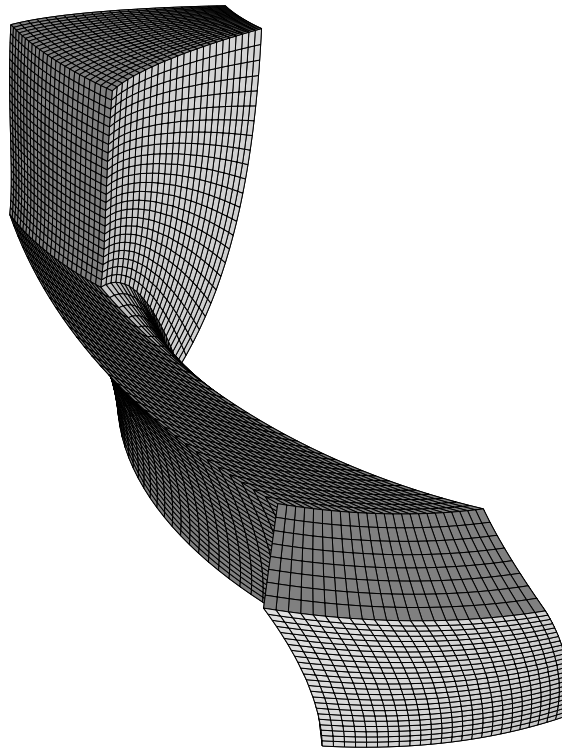
Massiivisesti rinnakkaisissa tietokoneissa tapahtuvia virtaussimulointeja varten kirjoitettu laskentahilan ja reunaehtoien pilkkomisohjelma `divp3d` päivitettiin myös ymmärtämään uusi reunaehto. Laskentatehtävää pilkottaessa staattorin ja roottorin välisen asentokulman on oltava nolla. Hilaa pilkottaessa on myös muistettava, ettei SLD-reunaehtotilkun sisältävää lohkoa voi jakaa kehän suunnassa (ks. luku 3).

## 5 Muutokset reunaehtotiedostossa

Liukuvan hilan reunaehto (SLD) annetaan reunaehtotiedostossa täsmälleen samalla tavalla kuin tavallinen lohkoliimaus (CON). Reunaehtoriville tulee ensin merkkijono SLD, jota seuraa seitsemän kokonaislukua. Neljä ensimmäistä kokonaislukua kertovat reunaehtotilkun koon ja sijainnin lohkon pinnalla. Kolme viimeistä lukua puolestaan kertovat minkä lohkon/minkä seinän/minkä reunaehtotilkun kanssa tämä kyseinen SLD-tilkku muodostaa parin. Jos SLD-tilkku peittää lohkon koko seinän, neljä ensimmäistä kokonaislukua rivillä voivat olla mitä tahansa. Niitä ei saa kuitenkaan jättää kokonaan pois, sillä virtausratkaisija lukee reunaehtotiedostoa listan ohjaamalla formaatilla.

## 6 Reunaehdon testaus

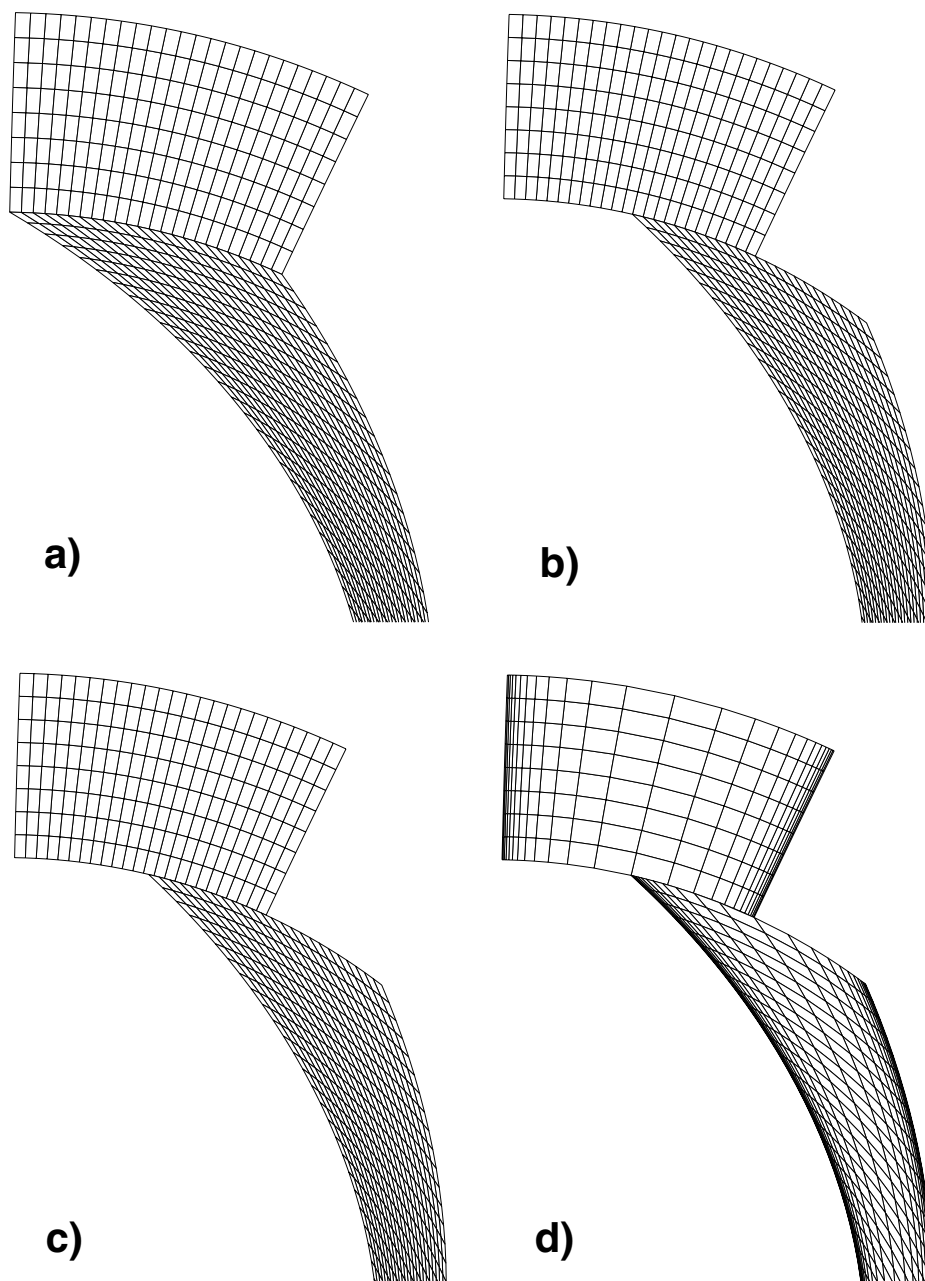
Uutta reunaehtoa testattiin laskemalla geneeristä pumppua kahdella erilaisella hilalla. Ensimmäisissä laskuissa käytettiin kehän suunnassa tasavälistä hilaa (kuva 2) ja myöhemmin hilaa, joka tiheni syklistä reunoille. Kaikki laskut tehtiin olettaen virtaustilanne ajasta riippumattomaksi.



**Kuva 2:** Geneerinen pumppusola.

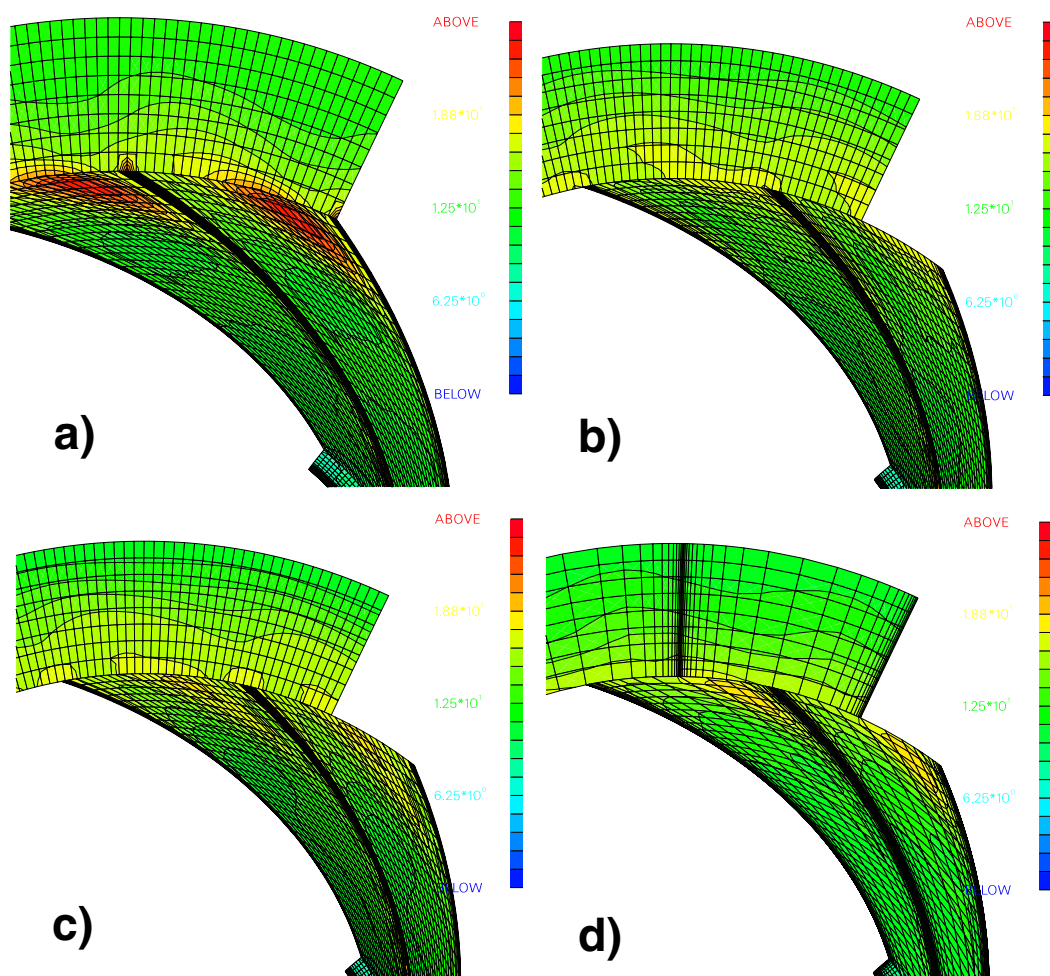
Ensimmäiseksi tasavälisellä hilalla laskettiin vertailutilanne siten, että roottorin ja staattorin välinen asentokulma oli nolla ja reunaehtona staattorin ja roottorin välissä tavallinen liimausreunaehto (kuva 3 tapaus a). Seuraavaksi laskettiin tilanne, jossa staattorin ja roottorin välinen kulma oli puolet syklistä syyskulmasta ja reunaehtona uusi liukuvan hilan reunaehto (kuva 3 tapaus b). Mallin syklistä syyskulma oli  $24^\circ$ . Koska käytetyssä hilassa oli kehän suunnassa tasavälisesti 24 laskentakoppia, laskentakopit roottorin ja staattorin pinnoilla yhtyivät tarkasti. Tilannetta vaikeutettiin edelleen siten, että roottorin ja staattorin välistä asentokulmaa kasvatettiin puoli astetta arvoon  $12,5^\circ$  (kuva 3 tapaus c). Nyt kutakin haamukoppia päivitettäessä jouduttiin käyttämään kahden varsinaisen laskentakopin arvoja.

Todellista käytännön tilannetta simuloitiin hilalla, joka tihennettiin kehän suunnassa alueen reunoille (kuva 3 tapaus d). Tällöin liukuvalla pinnalla syntyy tilanteita, joissa haamukoppien arvoja päivitetäessä joudutaan käyttämään arvoja monista erikokoisista laskenta-alueen kopeista. Toisaalta tällöin syntyy myös tilanteita, joissa päivitettävä koppi on kokonaisuudessaan yhden varsinaisen laskentakopin alueella. Tässä jälkimmäisessä tilanteessa haamukopin arvot saadaan suoraan varsinaisen laskenta-alueen arvoista. Tässäkin tapauksessa vektoreita ja tensoreita joudutaan mahdollisesti pyörittämään syklisyyskulman verran.



**Kuva 3:** Liukuvan hilan reunaehdon testitapaukset: a) tasavälinen hila, tavallinen liimaus (CON), b) tasavälinen hila, liukuvan hilan reunaehto (SLD), laskentakopit kohdakkain, c) tasavälinen hila, liukuvan hilan reunaehto (SLD), laskentakopit eivät kohdakkain ja d) reunoille tihentynyt hila, liukuvan hilan reunaehto (SLD), laskentakopit eivät kohdakkain.

Nopeusjakautuma pumpun siipisolassa eri testitilanteissa esitetään kuvassa 4. Kuviin on piirretty kaksi vierekkäistä kanavaa. Pumpun siiven paksuus on nolla, joten kanavat näyttävät olevan kiinni toisissaan. Tapauksessa a) nopeus lähellä siipisolän ulostuloa on suurempi kuin muissa tapauksissa. Tämä johtuu kuitenkin ainakin osittain siitä, että virtaus solassa sykkii (kuva 7). Tämä ilmiö esiintyy kaikissa tilanteissa. Sama sykkimisilmiö vaikuttaa myös nostokorkeuskäyriin (kuva 6).

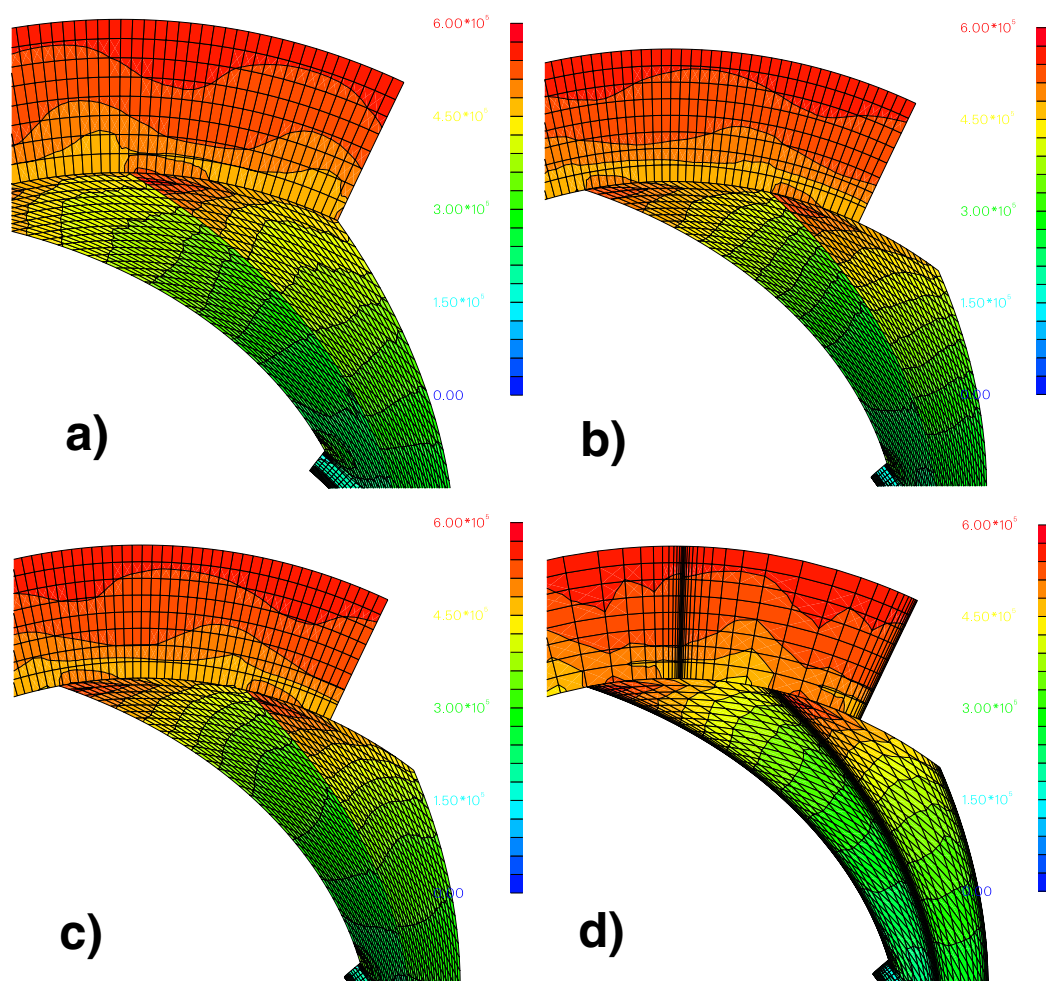


**Kuva 4:** Nopeusjakautuma pumpun kanavassa (kaksi solaa).

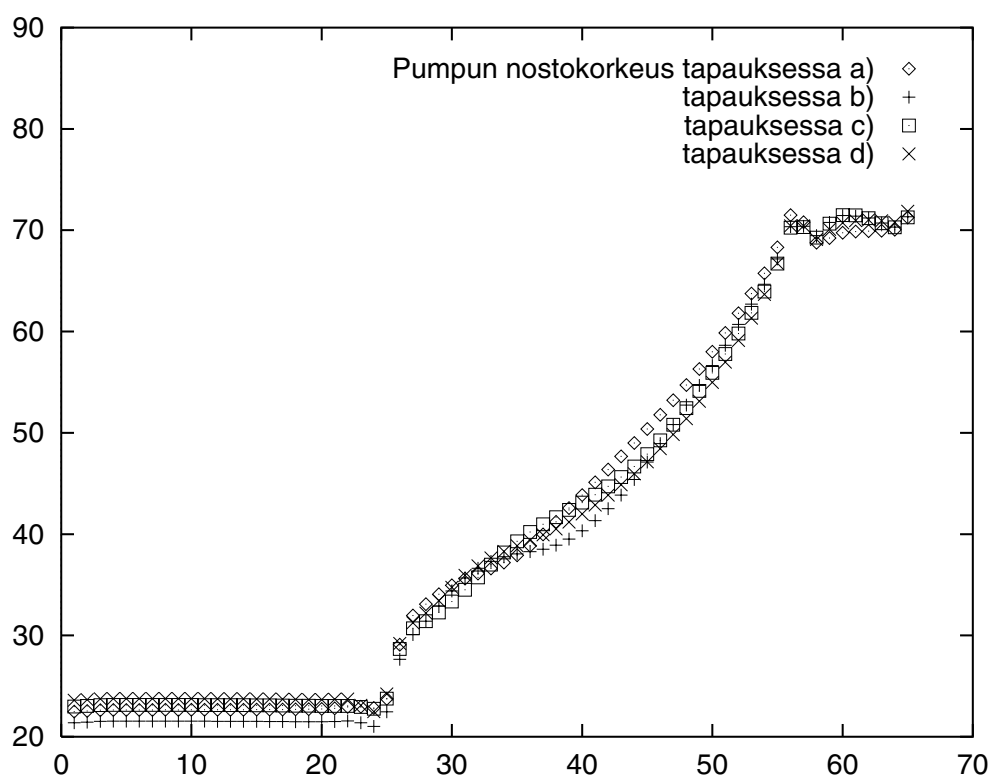
Staattisen paineen jakautuma pumpun siipisolassa esitetään kuvassa 5. Tapauksessa d) (reunoille tihevä hila) painejakautuma on selvästi rauhattomampi kuin muissa tapauksissa. Tämä ilmiö ei johdu virtauksen sykkimisestä vaan reunaehdon epätyytyttävästä toiminnasta. Massavirta sliding pinnan läpi säilyy kuitenkin hyvin. Ero roottori- ja staattorilohkojen välillä on vain prosentin murto-osa; ero näkyy neljännessä merkitsevässä numerossa. Massavirta pumpun yhden kanavan läpi on tässä simuloidussa tapauksessa noin 36,4 kg/s. Tähän arvoon päädytään kaikissa kolmessa liukuvan hilan reunaehtotapauksessa ja se on sama kuin liimausreunaehto käytettäessä.

Tässä tehdyn hyvin rajallisen testauksen perusteella uusi reunaehto näyttää toimivan, mutta varsinkin ei-tasavälisellä hilalla saattaa esiintyä stabiilisuusongelmia. Hila liukuvalla pinnalla kannattaa pyrkiä saamaan mahdollisimman tasaväliseksi kehän suunnassa. Tässä käytetyssä testitapauksessa todettiin haitalliseksi myös se, että liukuva hila sijoittui täsmälleen pumpun siipien jättöreunan kohdalle. Liukuva hilapinta kannattaa pyrkiä sijoittamaan aina mahdollisimman 'häiriöttömään' kohtaan.

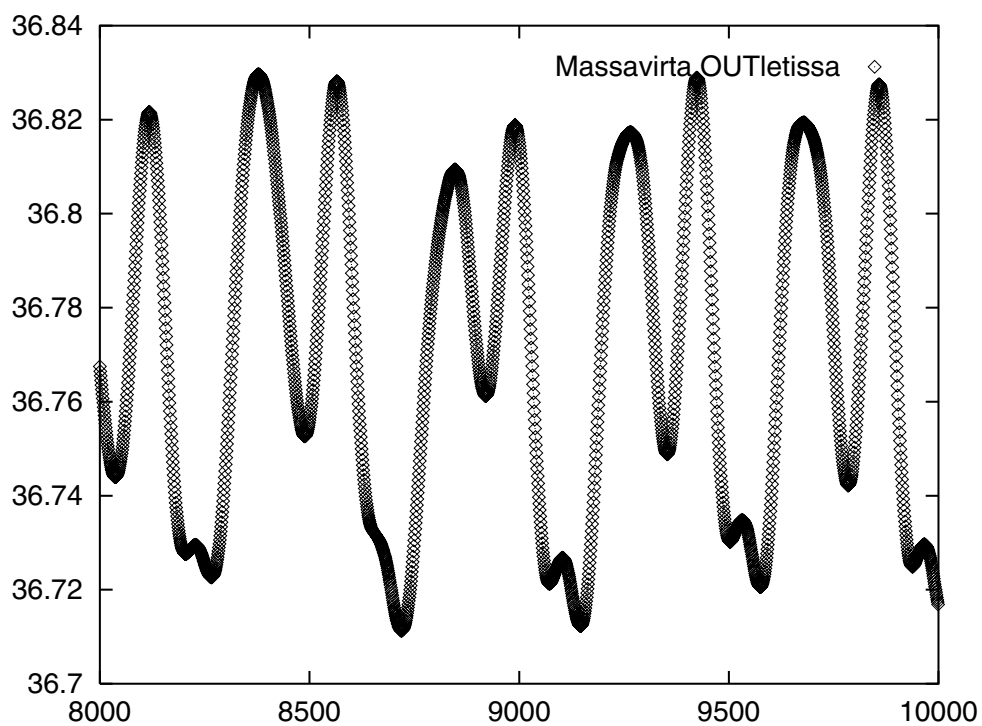




**Kuva 5:** Staattisen paineen jakautuma pumpun kanavassa (kaksi solaa).



**Kuva 6:** Pumpun nostokorkeus kanavan suuntaisen koppi-indeksin funktiona.



**Kuva 7:** Massavirta OUTletissa iteraatiokierroksen funktiona (tapaus d).

## 7 Yhteenveto

FINFLO-virtausratkaisijaan lisättiin liukuvan hilan reunaehto. Tällaista reunaehtoa tarvitaan tyypillisesti pyörivissä koneissa staattorin ja roottorin välisellä hilapinnalla ajan suhteen tarkoissa simuloinneissa. Tässä työssä reunaehdon toimivuutta testattiin ainoastaan staattisissa tapauksissa pyörittämällä roottori staattoriin nähden mielivaltaiseen asentoon ja vertaamalla tässä tilanteessa saatua ratkaisua ratkaisuun, joka saatiin roottorin asentokulman ollessa nolla.

Liukuvan hilan reunaehto toteutettiin siten, että haamukoppiarvoja ei päivitetä suoraan interpoloimalla lähimmäksi osuvien laskenta-alueen koppien avulla vaan päivityksessä otetaan painokertoimien avulla huomioon kaikki haamukopin alueelle osuvat laskenta-alueen kopit. Menettelyn tavoitteena on parantaa virtaussuureiden jatkuvuutta rajapinnan yli. Kehän suunnassa tasavälisellä hilalla jatkuvuus toteutuu hyvin, mutta yleisemmässä tapauksessa pakostakin osa informaatiosta rajapinnalla hukkuu. Liukuva hilapinta kannattaa pyrkiä sijoittamaan aina mahdollisimman 'häiriöttömään' kohtaan.

Uusi reunaehtotyyppi on laskennan kannalta jonkin verran raskaampi kuin tavallinen lohkoliimaus (itse asiassa se koostuu lohkoliimauksesta ja tietyistä lisäoperaatioista). Kaikissa testatuissa tapauksissa simuloinnin läpimenoaika uudesta reunaehdosta johtuen kasvoi vähemmän kuin 4 %. Vaikutus läpimenoaikaan riippuu luonnollisestikin suoraan siitä kuinka suuri osa simulointimallin reunaehdotilkuista on tätä uutta reunaehtotyyppiä. Tyypillisesti simulointimalleissa tullee olemaan vain yksi sliding-pinta, joten laskenta-aikojen voidaan olettaa kasvavan hyvin minimaalisesti.

## Viitteet

- [1] FINFLO User Guide, Version 2.2. Helsinki University of Technology, Laboratory of Applied Thermodynamics, Espoo 1996.
- [2] *James L. Thomas, Robert W. Walters, Taekyu Reu, Farhad Ghaffari, Robert P. Weston and James M. Luckring*, Application of a Patched-Grid Algorithm to the F/A-18 Forebody-Leading-Edge Extension Configuration. *Journal of Aircraft*, Vol. 27, No. 9, September 1990.